

Universidade de Brasília - UnB
Campus Darcy Ribeiro - Asa Norte
Departamento de Engenharia Elétrica

Imageador Térmico

Autor: Matheus Corrêa de Almeida
Orientador: Prof. Ricardo Zelenovsky , Doutor

Brasília, DF
2018



Matheus Corrêa de Almeida

Imageador Térmico

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof.Ricardo Zelenovsky , Doutor

Coorientador: Profa.Mylène C.Q. Farias , Doutora

Brasília, DF

2018

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

CM427i Corrêa de Almeida, Matheus
 Imageador Térmico / Matheus Corrêa de Almeida;
orientador Ricardo Zelenovsky; co-orientador Mylène C.Q.
Farias. -- Brasília, 2018.
60 p.

Monografia (Graduação - Engenharia Elétrica) --
Universidade de Brasília, 2018.

1. Sistemas Embarcados. 2. Imagens Térmicas. 3.
Processamento de Imagens. I. Zelenovsky, Ricardo, orient.
II. C.Q. Farias, Mylène , co-orient. III. Título.

Matheus Corrêa de Almeida

Imageador Térmico

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Elétrica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Elétrica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 06 de julho de 2018:

(Prof. Ricardo Zelenovsky, Doutor)
Orientador

(Profa. Mylène C.Q. Farias, Doutora)
Convidado 1

(Prof. Eduardo Peixoto, Doutor)
Convidado 2

Brasília, DF
2018

Dedico este trabalho aos meus pais Célia e José que sempre me apoiaram nessa caminhada, ao meu irmão Vinícius, e aos meus familiares e amigos.

Agradecimentos

Agradeço a todos os familiares que sempre me apoiaram aos meus amigos que me acompanharam durante essa jornada e aos meus orientadores pela ajuda e tempo dedicados a esse projeto.

"Perder tempo em aprender coisas que não interessam, priva-nos de descobrir coisas interessantes."

(Carlos Drummond de Andrade)

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a construção e desenvolvimento de um equipamento que permite a detecção de fontes de radiação infravermelha compreendida na faixa entre 8 e 12 μm . Esse sistema é composto por um sensor do fabricante Flir, Modelo: Lepton e por um sistema embarcado constituído de um kit de desenvolvimento baseado na linha de microcontroladores STM32F7, do fabricante STMicroelectronics. São utilizadas técnicas de processamento de imagens, onde uma versão portada para esta plataforma do software OpenCV, que em conjunto com outros algoritmos permite a transformação dos sinais oriundos do sensor em uma imagem térmica. A imagem é visualizada pelo usuário meio de uma tela lcd presente no kit, o software dispositivo é gerenciado por um sistema operacional em tempo real e controlado por uma tela sensível ao toque, e para o armazenamento e reprodução das imagens é utilizado um cartão de memória.

Palavras-chave: Sistemas Embarcados, Imagens Térmicas, Processamento de imagens.

Abstract

The current work have an objective of building and development of an equipment that is capable to detect irradiating sources of Infrared in an range of 8 to 12 μm . This system are composed by a sensor manufactured by Flir, Model Lepton and by an embedded system based on STM32F7 microcontrollers, manufactured by STMicroelectronics. With the aid of ported version to this plataform of the OpenCV software package and with auxiliary algorithms, the system can transform signals from the sensor to a visible image using image processing techniques. The user can view and analyse the images using a color lcd screen that are connected to the developepment kit. The system are managed by a real time operating system and controlled by a touchscreen interface and the images are storage by a memory card.

Keywords: Embedded Systems, Thermal Images, Image Processing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Distribuição de Planck ¹	28
Figura 2 – Distribuição espectral de energia para o quartzo e um radiador ideal. ²	29
Figura 3 – Diagrama do Bolômetro. ³	31
Figura 4 – Kit de desenvolvimento. ⁴	34
Figura 5 – Módulo Lepton V2.5. ⁵	36
Figura 6 – Caixa construída já integrada ao sistema.	37
Figura 7 – Diagrama de conexões.	38
Figura 8 – Organização das tarefas.	40
Figura 9 – Etapas de Processamento.	44
Figura 10 – Tela principal da interface gráfica.	47
Figura 11 – Imagens das cenas de análise.	50
Figura 12 – Motor de automóvel.	51
Figura 13 – Robô em funcionamento.	52
Figura 14 – Computador pessoal.	53
Figura 15 – Ferro de solda.	54

Lista de tabelas

Tabela 1 – Lista de Componentes	33
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGC	Automatic Gain Control
CRC	Cyclic Redundancy Check
EXT	Externo
FAT	File Allocation Table
FFC	Flat Field Correction
FMC	Fast Memory Controller
IDE	Integrated Development Environment
IR	Infra Vermelho
I2C	Inter-Integrated Circuit
LCD	Liquid Cristal Display
LWIR	Long Wave Infrared
LTDC	LCD-TFT display controller
MMC	MultiMediaCard
MWIR	Medium Wave Infrared
NETD	Noise equivalent temperature difference
NBR	Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
OTG	On The Go
RTOS	Real Time Operating System

SWIR	Short Wave Infrared
SDRAM	Synchronous dynamic random-access memory
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Synchronous random-access memory
Si	Silício
USB	Universal Serial Bus

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	24
1.2	Objetivos e Desafios	24
1.3	Organização da Dissertação ou Tese	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
3	COMPONENTES DE HARDWARE	33
3.1	Componentes	33
3.2	Descrição	34
3.3	Interconexões	38
4	COMPONENTES DE SOFTWARE	39
4.1	Elementos do Sistema	39
4.1.1	Ferramentas	39
4.1.2	Estrutura	40
4.1.3	Descrição	41
4.2	Algoritmos de Processamento de Imagens	44
4.3	Funcionalidades Implementadas	47
5	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
5.1	Método para a Avaliação	49
5.2	Experimentos	50
5.3	Avaliação dos Resultados	51
6	CONCLUSÃO	55
6.1	Principais Contribuições	55
6.2	Trabalhos Futuros	56

REFERÊNCIAS 57

Introdução

Os seres humanos apresentam capacidade limitada de percepção sobre as variáveis ambientais presentes no universo como som, luz, temperatura etc.. Logo há a necessidade de desenvolvimento de diferentes tipos de sensores para ampliar o campo de percepção humana, permitindo observar e analisar um grande número de fenômenos que antes não eram descritos.

O espectro eletromagnético é extenso entretanto o olho humano apenas consegue distinguir uma pequena faixa desse espectro que está contida nos comprimentos de onda entre 400 e 760 nanômetros correspondendo as cores vermelho e violeta. No entanto existem comprimentos de onda inferiores a 400nm (infravermelho) que estão associados à faixa de radiação qual os seres humanos não conseguem enxergar.⁶

A radiação infravermelha, por sua vez, é associada à uma significativa parte da energia emitida por um determinado corpo em função de sua temperatura, onde essa energia pode ser transferida para sua vizinhança sem necessidade de um meio físico para propagação. Este fenômeno denominado de radiação térmica, que difere de outros fenômenos como convecção e condução de calor nos quais há necessidade de um meio físico para propagação.⁷

A radiação infravermelha tem características distintas da luz visível. Para um mesmo material a radiação infravermelha pode ser refletida enquanto que a luz visível para o mesmo material é totalmente translúcida. Essas propriedades distintas têm uma ampla gama de aplicações nas áreas de segurança, manutenção, medicina, engenharia entre outras de modo que este campo de investigação tem se mostrado promissor.⁷

Devido à grande revolução tecnológica ocorrida no século XX, foi possível a construção de diversos tipos de sensores nos quais têm como características comuns: o tamanho diminuto, o baixo consumo de energia e o alto nível de integração. Conjuntamente com o desenvolvimento de sistemas computacionais de alto desempenho, foi possível a integração destes, permitindo o desenvolvimento de equipamentos portáteis cada vez mais sofisticados.

1.1 Motivação

Historicamente, os equipamentos para aquisição de imagens térmicas possuíam custos proibitivos impossibilitando sua aquisição por indivíduos comuns. Além disso havia o problema destes equipamentos serem grandes e necessitarem de baixas temperaturas para sua operação, exigindo uma grande quantidade de equipamentos externos para o seu correto funcionamento.

Havia também muitas restrições para sua aquisição por esta tecnologia ser considerada como estratégica. Também haviam poucas informações sobre seu funcionamento e das técnicas utilizadas para o processamento destas imagens. Atualmente os fabricantes deste tipo de dispositivo têm se mostrado pouco abertos à divulgação dos detalhes de funcionamento dos dispositivos deste modo, tem-se ainda um mercado muito restrito para o desenvolvimento desse tipo de tecnologia.

Por estes motivos, existe um amplo campo para a pesquisa e desenvolvimento deste tipo de equipamento. O estudo sobre esse tipo de equipamento possibilita o conhecimento das técnicas e métodos utilizados no seu desenvolvimento. O que leva a implementação de novas funcionalidades e realização de otimizações, assim permitindo a difusão do conhecimento a respeito deste tipo de tecnologia.

1.2 Objetivos e Desafios

O presente trabalho tem como principal objetivo a construção de um protótipo e o desenvolvimento do software necessário para seu funcionamento. O protótipo deve ser capaz de possibilitar investigação de fenômenos de natureza termodinâmica por meio da aquisição de imagens térmicas. Mais especificamente, o equipamento projetado deve ser capaz de possibilitar a visualização de cenas de interesse, o armazenamento dessas imagens, a reprodução das imagens capturadas, a análise em tempo real dos dados adquiridos, a aplicação de mapas de cores diferentes para cena em observação e a adequação da cena que está sendo observada às necessidades do usuário utilizando técnicas de processamento de imagens.

Os principais desafios deste projeto consistem na integração de algoritmos para processamento de imagens no protótipo construído no qual estes algoritmos possam ser utilizados para processamento em tempo real das imagens, uma vez que o hardware utilizado apresenta recursos de memória e processamento mais limitados do que os sistemas do tipo "PC". Além disso foi necessário integrar as diversas funcionalidades implementadas e os recursos existentes, de modo que o sistema tivesse boa capacidade de resposta ao usuário e bom desempenho de processamento de imagem.

1.3 Organização da Dissertação ou Tese

No capítulo 1 é discutido as considerações iniciais sobre o trabalho tal como a motivação e os objetivos principais. No capítulo 2 é discutido os fundamentos e o tema, onde introduzimos ao leitor os principais aspectos teóricos que permeiam o projeto. No capítulo 3 é feita uma relação e descrição dos componentes de hardware utilizados. No capítulo 4 são mostrados os detalhes do desenvolvimento da parte de software do projeto. O capítulo 5 trata sobre os experimentos realizados e a metodologia de avaliação utilizada, e neste capítulo também é feita a avaliação dos resultados. No capítulo 6 são feitas as considerações finais sobre o projeto.

Fundamentação Teórica

Desde a antiguidade os fenômenos relacionados a luz despertam curiosidade. Na Grécia antiga os estudos mais relevantes nesta área são atribuídos a Claudius Ptolemaeus, matemático, astrônomo e geógrafo que escreveu uma série de livros sobre óptica. Em um exemplar preservado, mostra que ele estudava fenômenos ópticos como reflexão, refração e espelhos.⁸

Já se sabia que a luz poderia ser decomposta devido à observação do efeito conhecido como "arco-íris" que ocorre quando a luz atravessava cristais ou vidro. Mas, apenas no século 17, Isaac Newton realizou uma série de experimentos com prismas (objeto óptico de superfícies planas, polidas e transparentes). No mais notável deles ele descreveu a propriedade de decompor ou remontar a luz visível.

Foi Newton que, pela primeira vez utilizou o termo "espectro de cor" para caracterizar o conjunto de feixes coloridos que não tem limites bem definidos. Estes feixes foram obtidos através da decomposição da luz ao atravessar um prisma provando que luz branca é composta por um conjunto de cores. Na época Newton acreditava que a luz era constituída de partículas e não tinha natureza ondulatória mesmo que já existissem evidências que a luz também poderia possuir caráter ondulatório.⁹

No século 19, Willian Herschel(1738 – 1822) realizou pesquisas com o objetivo de determinar a quantidade de calor associada a cada cor. Em seus experimentos, ele utilizou um prisma para decompor a luz branca, posicionando um termômetro em cada faixa de cor visível e um termômetro extra abaixo da cor vermelha. Surpreendentemente ele observou que o termômetro que apresentava maior temperatura era o que estava localizado abaixo da cor vermelha e assim concluiu que havia uma faixa de luz não visível que possui grande energia térmica.

Assim descobriu-se os chamados "raios caloríferos" e que foi posteriormente ficaram conhecidos como radiação infravermelha. Um ano mais tarde, Johan Wihelm Ritter(1776-1810) inspirado neste experimento descobriu que também existia uma faixa acima do espectro violeta (o ultra-violeta).¹⁰

Ainda no século 19, Michael Faraday (1791–1867) mostrou que existia uma interação entre os campos magnéticos e a luz, o que ficou conhecido como "Efeito Faraday". Em 1867, James Clerk Maxwell introduziu um novo trabalho que é o fundamento da moderna teoria eletromagnética, Maxwell propôs 4 equações que ficaram conhecidas como equações de Maxwell.

Apenas no ano de 1888, Heinrich Hertz (1857–1894) conseguiu de forma experimental comprovar a teoria de Maxwell realizando experimentos onde era possível produzir e receber ondas eletromagnéticas.¹¹

Os primeiros dispositivos capazes de detectar a radiação na faixa do infravermelho foram as termopilhas que são dispositivos que convertem a energia infravermelha incidente em tensão elétrica. O primeiro sensor deste tipo foi construído pelo físico Leopoldo Nobili (1784-1835). Em 1878, Samuel Pierpont Langley (1834-1906) construiu o primeiro bolômetro (ou calorímetro), que é uma estrutura cuja resistência elétrica varia em função da energia incidente sobre sua superfície.

Nos anos seguintes houve o desenvolvimento das teorias que relacionaram a intensidade da radiação emitida por um corpo $u(\lambda)$ em função do comprimento de onda (λ) e de sua temperatura (T). Em 1901 Max Planck (1858-1947) conseguiu relacionar essas variáveis para um corpo negro (objeto emissor/absorvedor perfeito) de modo formar uma função de distribuição que ficou conhecida como distribuição de Planck⁷ cujo o gráfico está apresentado na figura 1. A figura 1 mostra a relação entre a radiância ($u(\lambda)$) e o comprimento de onda (λ) para um corpo negro a uma dada temperatura (T).

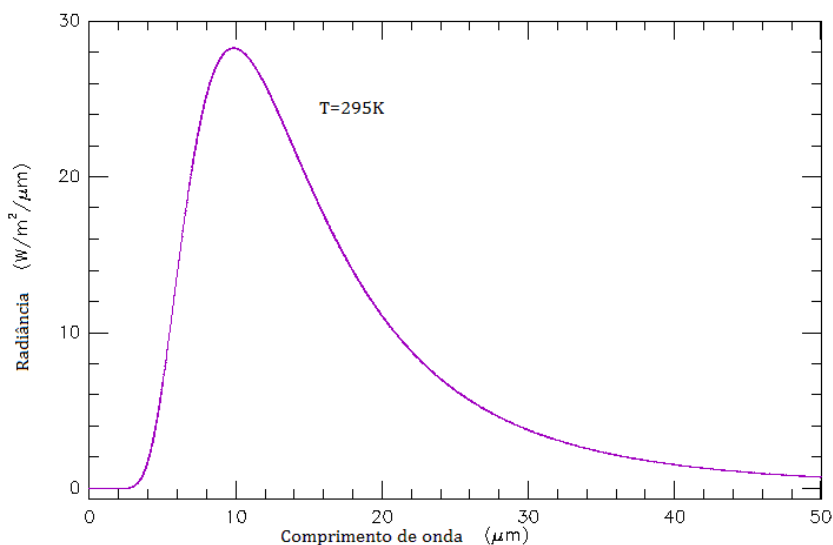


Figura 1 – Distribuição de Planck¹

A partir do modelo de Planck é possível a determinação da quantidade de radiação emitida em todas as direções e todos os comprimentos de onda por meio da determinação da temperatura do corpo negro, que ficou conhecida como Lei de Stefan-Boltzmaan sendo definida como:

$$E = \sigma T^4, \quad (1)$$

Onde σ é uma constante de valor igual a $5,670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, T é dado em Kelvin e E é a energia dada em W/m^2 . Entretanto as superfícies reais não apresentam as mesmas características do corpo negro. Pode-se definir a emissividade (ε) de uma dada superfície como sendo a razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura, ou seja a emissividade representa o quão eficiente a superfície irradia energia. Assim, a equação da energia emitida por uma superfície não ideal é dada por:

$$E = \varepsilon \sigma T^4. \quad (2)$$

É importante destacar que, a radiação espectral emitida por uma superfície real em relação a um corpo negro em geral, não apresenta a mesma distribuição em relação ao modelo de Planck para uma mesma temperatura. Pode-se verificar esta afirmação através do gráfico presente na figura 2. A figura 2 mostra a variação da energia irradiada de um corpo negro e do quartzo, em um dado intervalo de comprimento de onda a uma dada temperatura. Este fato mostra que a emissividade pode diferir significativamente para uma superfície não-ideal, quando comparado ao radiador ideal, para uma mesma temperatura.⁷

Assim, a potência radiante emitida por um superfície não-ideal é dada por:

$$P = A \varepsilon \sigma T^4, \quad (3)$$

no qual A é a área da superfície em m^2 .

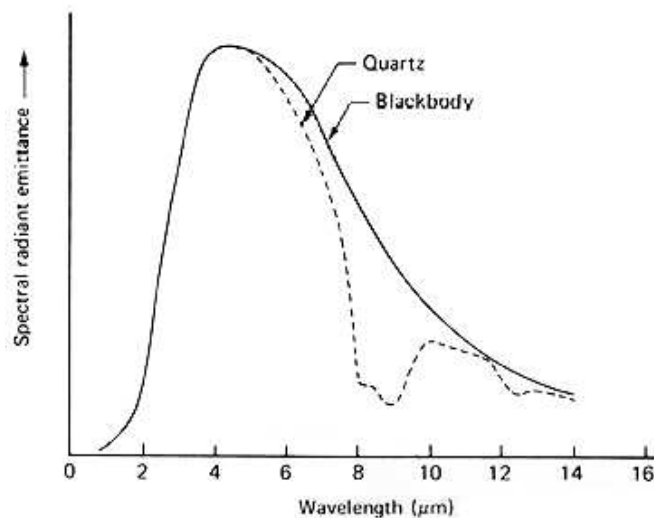


Figura 2 – Distribuição espectral de energia para o quartzo e um radiador ideal. ²

No mundo real, predominam as superfícies não-ideais, que também sofrem o efeito da radiação infravermelha incidente oriunda do meio. Se consideramos uma superfície ideal termicamente isolada tem-se, que pela lei da conservação de energia, a energia total incidente é igual a:

$$E(\text{incidente}) = \text{Energia Absorvida} + \text{Energia Refletida} + \text{Energia Transmitida}. \quad (4)$$

A energia transmitida pode ser definida como a fração da energia incidente que atravessa a superfície. A energia refletida é a fração da energia incidente que é refletida pela superfície do material. A energia absorvida, por sua vez, é aquela que provoca aumento de temperatura do corpo, pode-se dizer que ela corresponde à energia total emitida pelo corpo na faixa do infravermelho. Assim, a emissividade, grandeza na qual indica o quão eficientemente um corpo pode irradiar, pode variar significativamente para os diversos tipos de materiais.⁷

Os detectores que captam a energia na faixa do infravermelho apenas conseguem medir a soma da energia que está presente em um intervalo de comprimentos de onda para qual foram projetados. Existem detectores que trabalham na faixa denominada de SWIR (Short Wave Infrared) compreendido entre 0.9 a 1.7 μm . Há também detectores que operam na faixa denominada de MWIR (Medium Wave Infrared) que é compreendida entre 3 a 5 μm . Por último, temos a faixa denominada de LWIR (Long Wave Infrared) que se encontra entre 8 a 12 μm .

Os comprimentos de onda relacionados ao denominado infravermelho térmico estão contidos entre as faixas de 3 a 12 μm . Os detectores que são capazes de trabalhar nestes comprimentos de onda podem ser divididos nas seguintes categorias:

1. Detectores do tipo quântico.
2. Detectores do tipo térmico.

Os detectores do tipo quântico oferecem uma resposta mais rápida e um melhor desempenho de detecção. Entretanto, eles geralmente necessitam de refrigeração a baixas temperaturas para que se tenha boa sensibilidade, o que encarece bastante seu custo. Já os detectores térmicos utilizam-se da energia térmica oriunda da radiação infravermelho incidente na qual irá alterar alguma das suas propriedades físicas ex: resistência elétrica. Os detectores térmicos possuem a vantagem de não necessitar de resfriamento para operação e de sua sensibilidade ser independente do comprimento de onda em que ele opera. Por outro lado estes detectores apresentam um tempo de resposta maior em relação aos sensores do tipo quântico devido a sua inércia térmica.¹²

Dentro dos detectores do tipo térmico utilizados para a captura de imagens térmicas os mais utilizados atualmente são os do tipo bolômetros. Um bolômetro, representado na figura 3, funciona da seguinte forma: Um absorvedor de calor com capacidade térmica

C é termicamente conectado a um reservatório de calor que está a uma temperatura T_0 , esta conexão apresenta uma resistência térmica G .

O absorvedor detecta a potência da radiação incidente (P_{sinal}) e também o efeito da potência de polarização (P_{pol}) necessária para o funcionamento do sensor térmico que está conectado ao absorvedor. Quando a potência incidente varia, a temperatura T do absorvedor é alterada. A equação que modela este fenômeno é dada por:

$$T = T_0 + (P_{sinal} + P_{pol})/G. \quad (5)$$

Assim, a variação da potência de entrada P_{sinal} fará com que a resistência elétrica do elemento sensor seja alterada. Este elemento, por sua vez é polarizado com uma corrente constante. Medindo a tensão em seus terminais é possível determinar a temperatura T . Este sistema térmico apresenta uma constante de tempo térmica, que é dada pela razão entre a capacidade térmica do absorvedor e a condutância térmica G entre as estruturas, o que limita a velocidade de detecção do sensor.

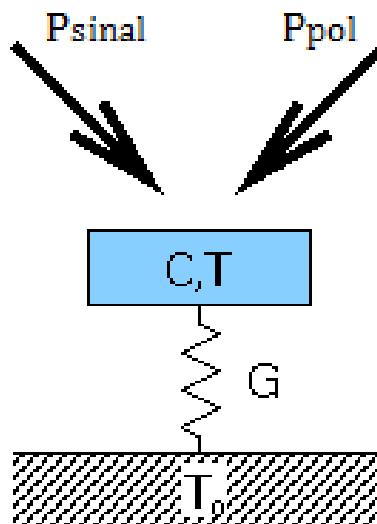


Figura 3 – Diagrama do Bolômetro. ³

Uma figura de mérito importante a se destacar é denominado de NETD. O NETD é uma medida que mostra qual é a sensibilidade do sensor a pequenas mudanças de temperatura. Quando o ruído é equivalente a menor temperatura que o sensor consegue medir pode-se dizer que o sensor atingiu seu limite de diferenciação entre ruído e sinal. Quanto maior o ruído, maior o valor do NETD.¹³

Componentes de Hardware

3.1 Componentes

Para a execução do projeto foi necessário alguns dispositivos de hardware que estão listados na tabela abaixo:

Kit de desenvolvimento STM32F746G-DISCO
Sensor Lepton V2.5
Placa adaptadora para sensor Lepton
Placa de circuito impresso padrão
Barra de pinos
Caixa customizada para montagem do sistema
Cartão micro-sd
Chave on-off
Bateria e conversor dc/dc step up
Parafusos de nylon

Tabela 1 – Lista de Componentes

A escolha desses componentes foi feita com base nos seguintes critérios :

1. Avaliabilidade no mercado.
2. Custo-Benefício.
3. Escalabilidade.

3.2 Descrição

Por se tratar de um sistema compacto e altamente integrado, que exige capacidade computacional elevada, a escolha da plataforma de hardware é um ponto crítico para a realização do projeto. Foi escolhido como base o kit de desenvolvimento STM32F746G-DISCO da empresa (STMicroelectronics). Essa plataforma é baseada na linha de microcontroladores STM32F7 que possuem núcleo ARM Cortex-M7 de alto desempenho.

Essa arquitetura é relativamente nova e apresenta uma série de funcionalidades e periféricos que permitiram um aumento significativo no desempenho, em relação à geração de chips anteriores. Entre elas podemos citar, a inclusão de memórias cache de dados e instrução, barramento de 64bits para acesso a memória flash interna e pipeline superescalar de 6 estágios.

O chip STM32F746, presente no kit, tem frequência de operação máxima do core de 216 Mhz, memória flash interna de 1MB e 320KB de memória SRAM (Synchronous random-access memory) interna. Essa linha de microcontroladores contém uma ampla gama de periféricos que possuem grande flexibilidade fazendo o conjunto bastante versátil.

Uma foto do kit é apresentada na figura 4, o kit conta diversos periféricos, entre eles:

1. Tela lcd (Liquid Cristal Display) colorida de 480 x 272 pixels com interface nativa e painel capacitivo.
2. Depurador integrado.
3. Portas de expansão.
4. Memória SDRAM (Synchronous dynamic random-access memory) externa de 8MB.
5. Entrada para cartão SD-MMC (Secure Digital Multi Media Card) com interface nativa.
6. Portas USB (Universal Serial Bus).



Figura 4 – Kit de desenvolvimento. ⁴

Para a aquisição das amostras de imagens foi utilizado o módulo Lepton V2.5 da empresa Flir, que é apresentado na figura 5. Este sensor permite a conversão da radiação infra vermelho incidente com comprimento de onda na ordem de 8-14 micrômetros, correspondendo à faixa LWIR (Long Wave Infrared) apresentando um NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) de 50mK. O sensor necessita de uma placa adaptadora para a interconexão elétrica e correto funcionamento.⁵

O módulo possui um conjunto de 80x60 micro bolômetros, construídos utilizando a tecnologia de Vox (óxido de vanádio). Este conjunto de bolômetros tem sua resistência elétrica alterada devido a energia infravermelha incidente sobre sua superfície. Esta tecnologia possui a vantagem de não necessitar de refrigeração, e integrado a esse conjunto existem circuitos de controle e pré processamento dos sinais amostrados assim provendo um sistema com grande nível de integração.

O sensor conta com um sistema fixo de lentes construídas de Si (silício). A utilização desse material se deve ao fato dele ser translúcido para a faixa de comprimento de onda de interesse e opaco a luz visível. Conta com um obturador que tem como funcionalidade a realização do FFC (Flat Field Correction). O FFC é um procedimento para correção de efeitos indesejados devido a mudança interna de temperatura do módulo, ele é realizado de forma automática ou por meio de comando enviado ao módulo.

Existem duas interfaces de comunicação presentes, uma interface I2C (Inter-Integrated Circuit) que é utilizada para controle e configuração de parâmetros do módulo e uma segunda interface SPI (Serial Peripheral Interface) full duplex, para a aquisição dos dados do sensor. A interface SPI opera na frequência máxima de 20Mhz, algo que é desejável. Uma vez que cada quadro pode possuir mais de 10KB, uma leitura mais rápida é benéfica uma vez que tem-se mais tempo para o processamento das informações.

A saída de vídeo apresenta tamanho variável de dados a serem lidos. Entretanto ela apresenta estruturas fixas como a presença de um cabeçalho com 4 bytes no início de cada linha de vídeo. Os dois primeiros bytes indicam se o quadro é válido e os dois bytes seguintes indicam o CRC (Cyclic Redundancy Check) do quadro atual. Essas informações são importantes para o correto processamento e sincronização das informações.

O módulo permite a configuração da saída de vídeo para os seguintes modos:

1. RAW: Modo saída bruto, no qual os valores do sensor não recebem nenhum processamento de sinais, exibindo valores inteiros entre 0 e 16384.
2. RGB888: A saída de dados passa por processamento interno, no qual há uma transformação ponto-a-ponto da faixa de valores de 14bits para o espaço de cores RGB888 onde existe uma tabela de padrão de cores, que pode ser escolhida pelo usuário, na qual há uma função que correlaciona os valores de temperatura a uma determinada cor através de uma pseudo colorização.

Para o modo RAW pode-se selecionar as seguintes configurações:

1. Radiometric: Esse modo normaliza a saída do sensor e a torna independente da temperatura interna do sensor.

2. Tlinear: A saída do sensor é compensada em função dos parâmetros de calibração internos do sensor. Nesse modo, a saída apresenta um valor inteiro 16 bits (0 - 65535) e o valor correspondente de cada ponto na escala de temperatura (em Kelvin), sendo necessário a subtração do valor de 273.15K para obtenção do valor em Celsius.

3. AGC: A saída de dados passa por processamento interno no qual há uma transformação ponto a ponto da faixa de valores de 14bits para o espaço de cores RGB888 a imagem resultante é dada em escala de cinza.

A configuração de cada modo é feita por meio do envio de comandos pela interface I2C. A alteração de modo de saída pode modificar a quantidade de informações a serem transferidas, o que gera a necessidade de modificação do tamanho dos buffers de armazenamento.

Foi construída uma caixa para abrigar o conjunto, de modo a tornar o sistema mais protegido contra danos físicos e elétricos. Um modelo foi elaborado com a ajuda do laboratório aberto de Brasília que fica localizado no campus da Universidade de Brasília (prédio do SG8). No local, é possível ter acesso aos equipamentos de impressão 3D, também é oferecido suporte na construção dos modelos a serem impressos, como o que foi utilizado. A figura 6 mostra ângulos da caixa projetada já integrada ao sistema.



Figura 5 – Módulo Lepton V2.5. ⁵

Para a alimentação foi utilizado uma bateria e um circuito dc-dc que possui sistema de carga e controle de baterias de Lítio. Esse circuito foi retirado de um carregador portátil de celulares conhecido popularmente como "powerbank".

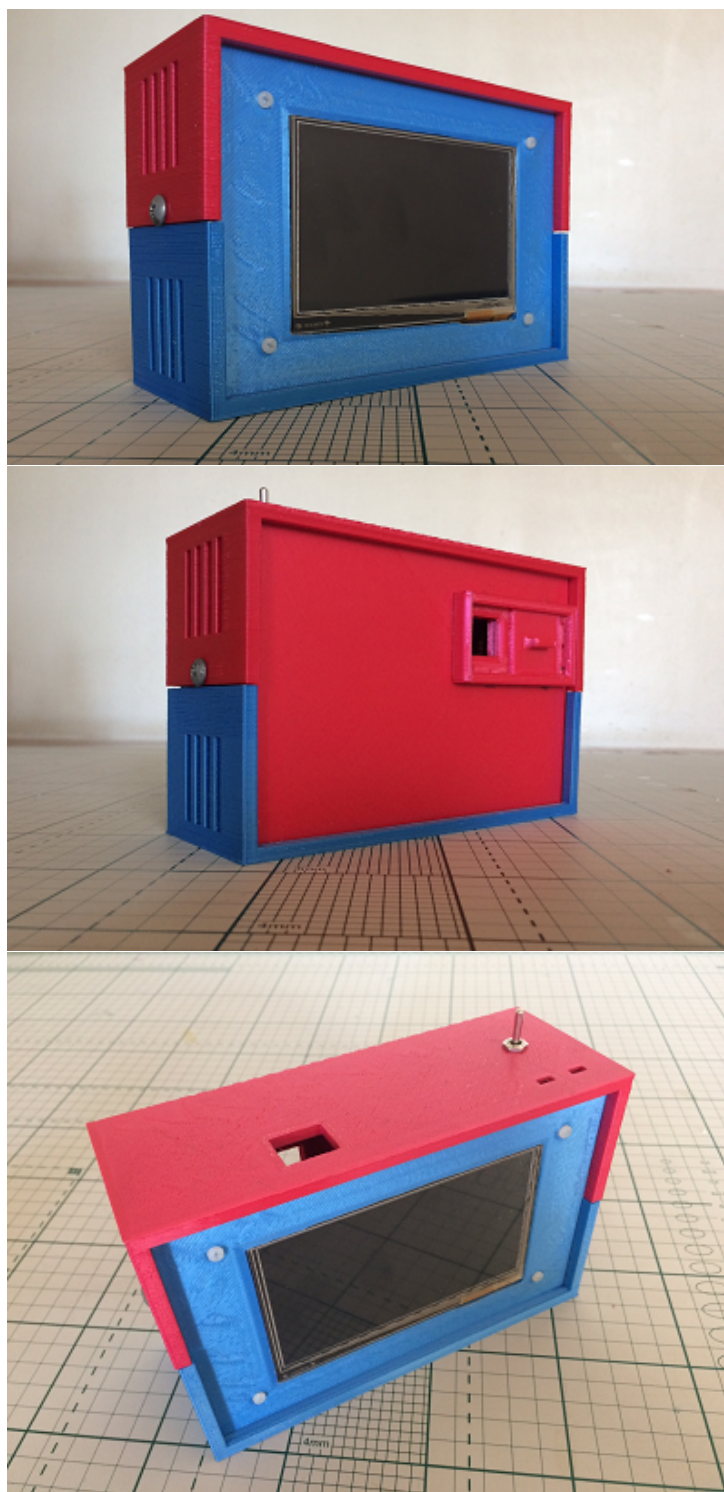


Figura 6 – Caixa construída já integrada ao sistema.

3.3 Interconexões

A integração dos componentes foi realizada como descrito no diagrama abaixo:

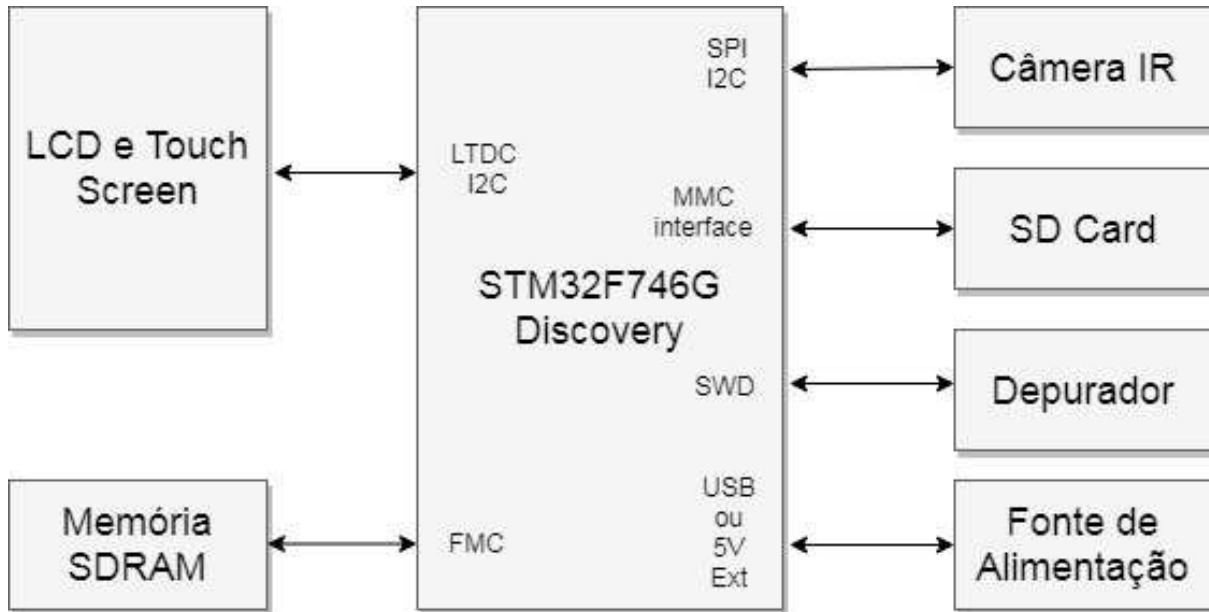


Figura 7 – Diagrama de conexões.

Esse arranjo foi realizado de modo a se obter o máximo de funcionalidade e utilização racional dos periféricos presentes na placa, de modo a prover um sistema compacto. Além disso buscou-se minimizar o número de componentes externos a serem conectados no sistema de modo a facilitar a construção do protótipo.

Componentes de Software

4.1 Elementos do Sistema

4.1.1 Ferramentas

Para a construção do dispositivo foi necessário a utilização de diversos recursos de software, com cada um deles possuindo atribuições distintas. No desenvolvimento do firmware embarcado foi utilizada a IDE (Integrated Development Environment) SW4STM32, sendo esta exclusiva para a linha de microcontroladores STM32. A ferramenta pode ser obtida gratuitamente na página <http://www.openstm32.org/HomePage>, sem qualquer limitação de uso.

O ambiente de desenvolvimento é baseado na plataforma eclipse e a linguagem de programação utilizada foi o C. A IDE utilizada possui diversas ferramentas integradas na forma de plugins, que em conjunto com a interface de depuração (integrada ao kit de desenvolvimento) ajuda o desenvolvedor a tornar mais produtiva e eficiente a tarefa de programação. O compilador utilizado por esta plataforma é o GCC para arquiteturas ARM Cortex-M onde este já está integrado a IDE.

Como auxílio ao desenvolvimento, configuração e compreensão dos periféricos, foi utilizado um pacote de bibliotecas para a família de microcontroladores STM32F7 denominado de STM32cube. O projeto foi estruturado com base no componente STM32Cube HAL, que possui camadas de abstração de hardware que facilitam o desenvolvimento do firmware.

Neste pacote existem diversos exemplos que serviram como guia no processo de desenvolvimento, permitindo a customização da camada de abstração quando esta se mostrou insuficiente para que fossem realizadas as tarefas necessárias. É importante enfatizar que os pacotes estão em constante atualização por parte do fabricante, de modo a oferecer correção de erros, novas funcionalidades e melhorias.

4.1.2 Estrutura

O sistema é composto das seguintes estruturas básicas:

1. Tarefa responsável pela inicialização dos periféricos do sistema.
2. Tarefa responsável pela leitura e sincronização da câmera.
3. Tarefa responsável pela interface gráfica e de usuário.
4. Tarefa responsável pelo processamento das imagens.
5. Tarefa responsável pelo armazenamento e leitura das imagens.

Deste modo foi verificada a necessidade da utilização de um sistema operacional de tempo real (RTOS), uma vez que esse conjunto de tarefas necessita de demandas distintas de memória, processamento e tempo de execução determinístico.

Assim foi escolhida a utilização de um RTOS denominado de FreeRtos (disponível em <https://www.freertos.org/>) devido a sua grande popularidade, boa documentação, fácil integração e pelo fato de ser oferecido de forma gratuita. Um bom guia para sua utilização pode ser encontrado em https://freertos.org/Documentation/RTOS_book.html.

O diagrama abaixo mostra como está organizada as tarefas que estão sendo executadas:

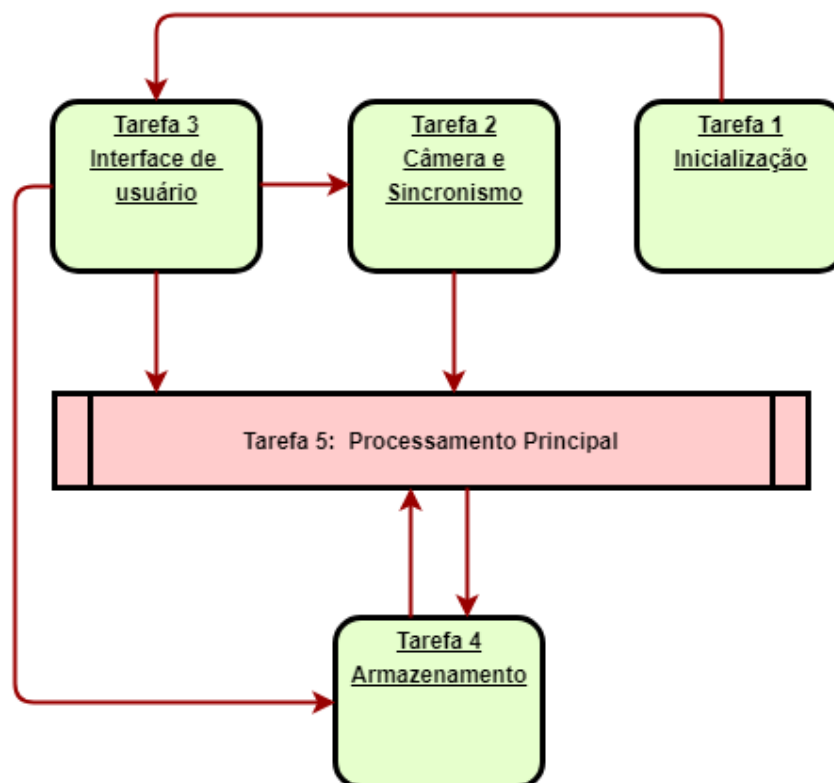


Figura 8 – Organização das tarefas.

4.1.3 Descrição

Aqui será feita uma breve descrição do funcionamento de cada tarefa de modo a esclarecer sua finalidade e mostrar como foi organizado a prioridade de cada tarefa.

A tarefa 1 é responsável pela inicialização dos seguintes periféricos:

1. Configuração das portas de I/O e clocks para periféricos.
2. Configuração da porta SPI e seu respectivo canal de DMA.
3. Configuração da porta I2C.
4. Configuração da memória SDRAM.
5. Configuração da interface para LCD (LTDC).

A tarefa 1 não está associada ao escalonador de tarefas e seu trabalho também é de criar as outras tarefas e inicializar o escalonador. No processo de inicialização do escalonador é definida a prioridade de cada tarefa, com base na sua necessidade de execução em relação aos demais elementos do sistema. Neste ponto também é definido a quantidade de memória que cada tarefa irá requerer da memória de pilha, este processo é realizado de forma heurística já que não há a priori como determinar a quantidade exata que cada tarefa necessitará.

Após a inicialização do escalonador, todas as tarefas têm uma pequena fase de inicialização das suas variáveis internas e de periféricos. A partir deste momento, as ferramentas de sincronismo de tarefas (como mutex e eventos) atuarão de modo a garantir que o sistema atue de modo funcional (como foi projetado).

A tarefa 2 é responsável por manter o sincronismo da câmera. Após a energização do sistema há a necessidade de que não haja acesso a interface de dados SPI por aproximadamente 1S. Após este período pode ser enviado pacotes de leitura pela porta SPI até que quadros válidos sejam retornados pela câmera Lepton. A partir deste momento, deve-se manter o procedimento de leitura dos quadros de dados em intervalos de aproximadamente de 38.4 ms. Cada quadro não deve demorar mais de 32ms para ser completamente lido.⁵

Por este motivo é utilizado DMA (Direct Memory Access) em conjunto com o barramento SPI operando a 24Mhz para minimizar o tempo de leitura dos quadros. O cabeçalho de cada quadro tem 4 bytes onde os dois primeiros bytes mostram se o quadro é válido ou não e os dois bytes seguintes são relacionados ao CRC (Cyclic Redundance Check) dos dados subsequentes (caso sejam estes válidos).

O restante dos dados de cada quadro variam em quantidade, de acordo como o modo de operação selecionado. Logo é importante verificar qual modo foi selecionado, uma vez que todos bytes que constituem um quadro devem ser lidos para que não haja perda de sincronismo ou erros nas informações a serem processadas. Esta tarefa também é

responsável por notificar a tarefa de processamento quando quadros válidos foram lidos e podem ser processados.

A tarefa 2 apresenta a maior prioridade sobre as outras pois necessita ser executada de forma determinística. Sua execução inicial é condicionada a o comando de START oriundo da interface de usuário. Após este comando, o processo de sincronização é executado. Após a sincronização inicial, a execução da tarefa é condicionada a um timer configurado na inicialização desta tarefa, que gera uma interrupção em um intervalo de tempo fixo.

A tarefa 3 tem como objetivo a integração à interface de usuário, de modo a permitir ao usuário ações que venham prover o controle e manipulação do sistema. Para esta finalidade foi utilizado a biblioteca μ GFX disponível em <https://ugfx.io/>, esta possui um conjunto de ferramentas que torna possível a criação de uma interface gráfica.

Por meio da tela sensível ao toque presente no kit de desenvolvimento esta ferramenta permite a interação do usuário com o sistema, além de prover mensagens ao usuário sobre o status do sistema. A biblioteca em questão pode ser utilizada sem custo para fins acadêmicos ou não comerciais. Ela apresenta documentação razoável, com alguns exemplos que auxiliam no processo de entendimento do funcionamento da biblioteca.

Esta tarefa é executada a cada 80ms e apresenta um nível de prioridade menor do que a tarefa 2 que possui a maior prioridade entre as tarefas presentes. Assim, é possível obter uma resposta rápida aos comandos do usuário sem que haja lentidão na resposta ou que o desempenho do sistema seja afetado, uma vez que esse processo não ocupa muitos recursos de processamento.

A tarefa 4, por sua vez, é responsável pelo armazenamento das imagens processadas, ocorre primeiramente a inicialização da interface sd-mmc, no qual é detectado se há presença de cartão de memória. Caso este esteja presente, habilitam-se as funções de captura e reprodução de imagens e caso contrário exibe-se uma mensagem ao usuário que não há presença de cartão além disso desabilitam-se as funções relacionadas ao acesso do cartão micro-sd.

Foi implementado um sistema de arquivos do tipo FAT (File Allocation Table) através de uma biblioteca chamada de FATFS, na qual foi integrada a biblioteca de baixo nível responsável pela comunicação com o cartão micro-sd. As informações relativas as imagens são salvas no formato .BMP ou bitmap. Foi escolhido este formato de armazenamento, pois o mesmo não incorre em perda de qualidade, uma vez que não é utilizada nenhuma técnica de compressão.

O formato bitmap permite ainda a inserção entre o cabeçalho e o começo dos dados da imagem de um offset de tamanho determinado pelo usuário, este espaço foi utilizado para armazenamento dos dados não processados e deste modo é possível o reprocessamento da cena original de forma externa de modo a facilitar o desenvolvimento dos algoritmos utilizados. Os dados relativos a imagem processada encontram-se no formato RGB888 que é um formato válido tanto para reprodução pelo dispositivo construído quanto para

sistemas do tipo PC.

Quando o usuário executa a ação de capturar a cena de seu interesse, a tarefa de interface de usuário notifica a tarefa de armazenamento e esta por sua vez utiliza-se de um mutex, onde este é um elemento de sincronização de tarefas no qual gerencia o acesso de recursos compartilhados entre tarefas, isto faz que apenas quadros totalmente processados sejam salvos assim evitando erros.

Esta tarefa possui prioridade menor do que as tarefas anteriores pois esta não necessita ser executada periodicamente ou ter tempo de execução determinístico.

Por fim a tarefa 5 é responsável pelo processamento das imagens, aqui é realizado toda a parte de condicionamento dos dados oriundos da câmera e seu envio ao display, esta parte ocupa maior tempo de processamento e seu tempo de execução varia de acordo com os requerimentos do usuário, e por isto foi designada a ela a menor prioridade de execução. Assim as outras tarefas podem ser executadas sem penalidades em relação ao total de processamento disponível e o processamento de imagens pode ocorrer sem falhas.

Com esta configuração foi possível obter um sistema que atendesse de forma bastante satisfatória os requerimentos do projeto, sendo possível implementar todas as funcionalidades básicas propostas o que tornou um sistema realizável mesmo com as limitações de processamento e memória presentes.

4.2 Algoritmos de Processamento de Imagens

Um ponto importante deste projeto consiste na obtenção do mapa de temperatura da cena de interesse e sua transformação em uma imagem térmica onde por meio desta é possível a análise de fenômenos térmicos de interesse. Neste projeto foi utilizado o seguinte esquema para a transformação de uma mapa de temperatura em uma imagem:

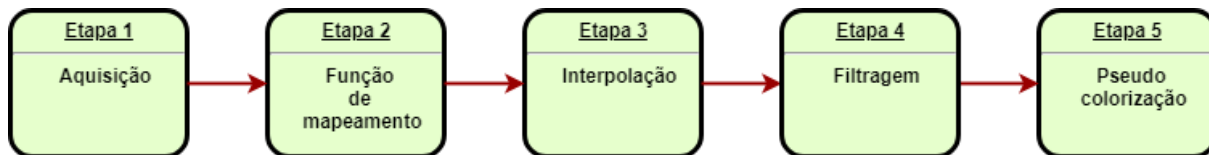


Figura 9 – Etapas de Processamento.

Como auxílio para a realização desta etapa foi portado parcialmente o software conhecido como OpenCV. Este software contém algumas funcionalidades necessárias já implementadas como alguns algoritmos que seriam interessantes como: interpolação, filtragem e transformação do espaço de cor. O OpenCV é nativo de plataformas do tipo "PC" então é necessário que sejam feitas algumas alterações no pacote para que o mesmo possa ser integrado ao sistema.

Dentre elas podemos citar, a remoção de partes relativas a processamento de vídeo, otimizações por parte do compilador que permitem aumento na velocidade de execução e redução do tamanho de código por meio da retirada inteligente de funções que não estão sendo utilizadas, utilização de código C ao invés de C++ de forma a melhorar a performance dos algoritmos.

Após o processo de captura do mapa de calor da cena há a necessidade de uma função que mapeie a temperatura a uma determinada intensidade de cor, a faixa entre as temperaturas presentes na cena podem variar amplamente entretanto para se formar uma imagem digital de 1 dimensão estamos limitados na faixa entre $[0,255]$.

Deste modo a função de mapeamento deve, da melhor forma possível, gerar uma imagem visualmente aceitável para diferentes condições assim esta etapa é uma das mais importantes para a obtenção de resultados aceitáveis. Neste projeto foram utilizadas dois métodos distintos para a implementação da função de mapeamento:

1. Método de mapeamento linear.
2. Método PLATEAU de equalização de histograma.

O método de mapeamento linear consiste na determinação do valor máximo e mínimo de temperatura da cena presente e relaciona o valor de cada ponto do conjunto de dados original de acordo com a seguinte equação:

$$P_{saída}(i) = \frac{(i - T_{min})}{(T_{máx} - T_{min})} * 255, \quad (6)$$

Este método é de fácil implementação e tem bom desempenho em termos de velocidade de processamento entretanto possui a desvantagem que em certas ocasiões causar uma situação onde a cena que está sendo observada apresenta contraste muito baixo.

O método de Plateau de equalização de histograma¹⁴ é uma modificação da equalização de histograma, onde um limite superior é aplicado sobre a soma cumulativa do número de ocorrências de determinado nível do histograma. Este método visa a melhoria do contraste de imagens do tipo térmicas, uma vez que estas imagens geralmente apresentam uma quantidade de informações comprimida em uma faixa muito reduzida de níveis de intensidade. Assim, as imagens térmicas geralmente possuem baixo contraste.

O método de Plateau é dividido nas seguintes etapas:

1. Construção do histograma.

Neste passo é encontrado o valor máximo e mínimo de temperatura da cena, em seguida os dados são ordenados de forma crescente. Em seguida forma-se o histograma discreto dos dados de interesse, onde seus limites são dados pelos valores de máximo e mínimo de temperatura que foram anteriormente determinados. Neste trabalho foi utilizado 300 divisões para criação do histograma o que se mostrou suficiente para se conseguir um histograma com resolução adequada.

2. Determinação do valor de limiar P

Segundo Vikers o valor de P pode ser determinado de forma analítica ou por método heurístico, considerando a percepção do usuário. O valor do limiar de P deve estar entre 1 e o valor de pico do histograma. Este valor está relacionado ao ganho de contraste total que pode ser obtido.

3. Algoritmo de processamento

Munido do histograma e do valor de P, a seguinte equação é utilizada para determinação ponto-a-ponto do valor dos pixels da imagem equalizada:

$$Pixel_{saída}(i) = \frac{S_i(P)}{S(P)} * 255, \quad (7)$$

Onde:

$$S(i,P) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{i-1} C(k, P) & \text{para } i \geq 1, \\ 0 & \text{para } i = 0, \end{cases} \quad (8)$$

E temos:

$$C(k, P) = \text{Min}(L_k, P), \quad (9)$$

L_k é definido como o número de pixels que possuem o nível k , assim $S(i, P)$ será a soma parcial do número de contagens limitados por P até o nível k .

E por fim: $S(P)$ é a soma total do número de contagens até o nível $k(\text{máx})$ onde P é o valor limitante seguindo a equação:

$$S(P) = \begin{cases} \sum_{k=1}^k C(k, P) & \text{para } 1 \leq i \leq \text{Valor máximo de } k \\ 0 & \text{para } i = 0, \end{cases} \quad (10)$$

O processo de mapeamento gera um quadro que apresenta apenas 1 canal de cor. Após este processo, é necessário uma expansão da imagem obtida uma vez que, originalmente o sensor apresenta apenas uma resolução de 80x60 pixels o que dificulta a análise da cena. Através de métodos interpolação de imagens ¹⁵ aumentamos a resolução espacial da cena para 320x240 pixels o que permite analisar a cena de interesse com mais detalhes.

O pacote OPENCV utilizado apresenta alguns tipos de interpolação são elas:

1. Vizinho próximo
2. Bilinear.
3. Bicúbico.

O método Bilinear e Bi-cúbico foram os escolhidos por gerarem uma imagem com qualidade superior, ou seja com menos serrilhamento quando comparados ao método do vizinho próximo.

Após o processo de interpolação pode-se utilizar algum tipo de filtro espacial de modo a atenuar o ruído presente na imagem, entretanto a não utilização do filtro de modo geral não afeta a observação dos fenômenos desejados neste caso. Foi utilizado o filtro de Mediana por este requerer moderada carga computacional e apresentar bons resultados.

Na etapa final é necessário a transformação do espaço de cor uma vez que toda a etapa de processamento é realizada com apenas um canal de cor devido a própria natureza da fonte de entrada que não possui informação relativa a cor, o display apresenta um formato de entrada na forma ARGB888, onde A é relativo ao canal de luminância.

Pode-se realizar a conversão de canal de cor de dois modos distintos, um deles puramente via software por meio de funções presentes no OPENCV ou utilizando o periférico LTDC (LCD-TFT display controller) que permite que esta conversão seja feita via hardware, basta apenas setar o parâmetros necessários e carregar em uma região de memória mapeada por este periférico uma tabela que contém o mapa de cor que se deseja aplicar para ser realizado o processo de conversão.

4.3 Funcionalidades Implementadas

Em suma as seguintes funções foram implementadas:

1. Captura de imagens.
2. Função de termômetro remoto (Spot Meter).
3. Reprodução de imagens salvas.
4. Aplicação de mapas de cor.
5. Filtragem Mediana.
6. Mapeamento Linear.
7. Mapeamento Plateau.
8. Variação do parâmetro P.
9. Interpolação bilinear.
10. Interpolação bicúbica.
11. Terminal de mensagens para o usuário.

Abaixo temos uma amostra da interface gráfica que foi implementada:

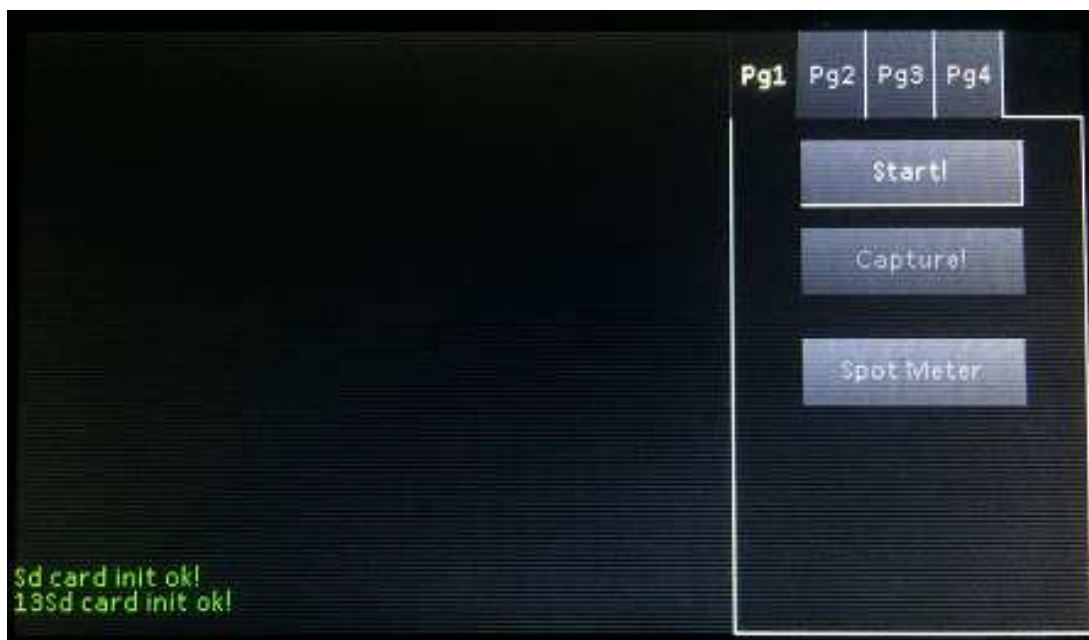


Figura 10 – Tela principal da interface gráfica.

Experimentos e Análise dos Resultados

Nesta seção serão feitas análise simples de amostras observadas com intuito de verificar-se o desempenho do sistema e dos algoritmos utilizados.

5.1 Método para a Avaliação

Como método de avaliação será utilizado para a análise das imagens por meio de histogramas e avaliação subjetiva. Também será utilizado como medida para contraste o desvio padrão das imagens térmicas¹⁶. Um maior valor para o desvio padrão indica que o histograma da imagem está melhor distribuído pela faixa de sinal disponível, e como consequência a imagem tende a apresentar melhor contraste.

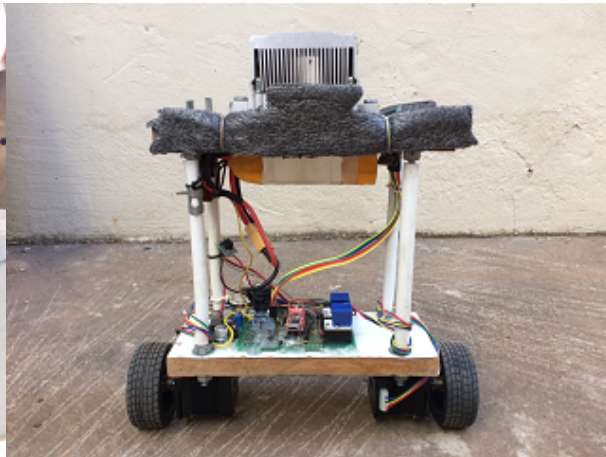
Não há um conjunto de imagens térmicas que sirvam de referência, logo serão efetuadas apenas comparações entre as imagens capturadas, aqui também apenas serão utilizadas imagens em escala de cinza.

5.2 Experimentos

Serão capturadas imagens térmicas para as cenas presentes na figura 11, para cada cena serão avaliadas imagens processadas pelos métodos de mapeamento linear e plateau. Essas imagens servem apenas como referência sobre o tipo de objeto que está sendo visualizando uma vez que o sensor não trabalha no espectro correspondente a luz visível, devido ao fato de que suas lentes são completamente opacas a luz visível.



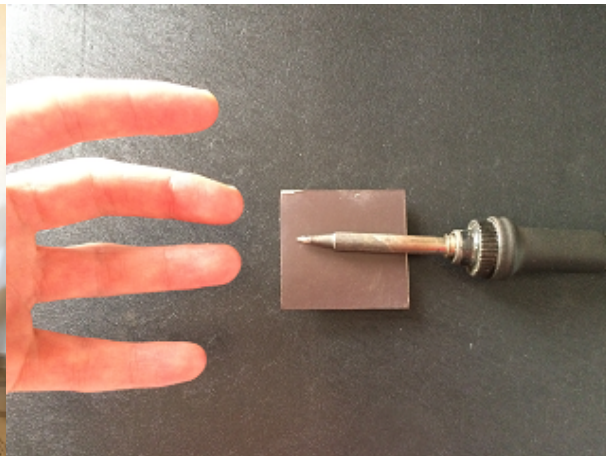
(a) Motor de automóvel.



(b) Robô



(c) Computador pessoal.



(d) Ferro de soldar e mão

Figura 11 – Imagens das cenas de análise.

5.3 Avaliação dos Resultados

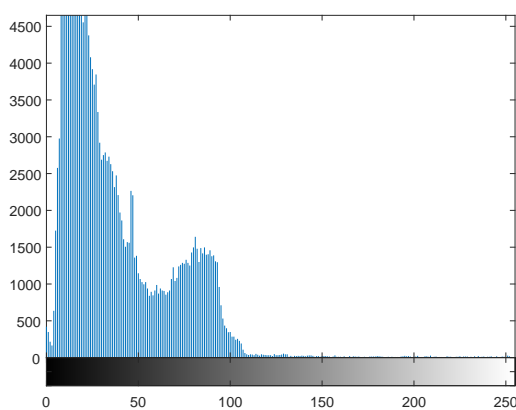
A figura 12 mostra o ensaio (a) relativo ao motor de automóvel após funcionamento. Quando se compara os itens (a) e (b) verifica-se que a imagem (b) possui mais detalhes principalmente em relação ao plano de fundo. Quando se analisam os histogramas (c) e (d) associados aos métodos de mapeamento linear e plateau ($P = 5$), pode-se observar que o método linear utiliza uma pouco menos da metade da faixa de sinal disponível.

Já o método plateau consegue distribuir melhor os níveis de intensidade entre a faixa de sinal disponível, o que leva a imagem a apresentar mais detalhes. Para a imagem (a) temos um valor de desvio padrão de 30 para a figura (a) e 60 para (b), evidenciando que obteve-se um aumento de contraste na cena.

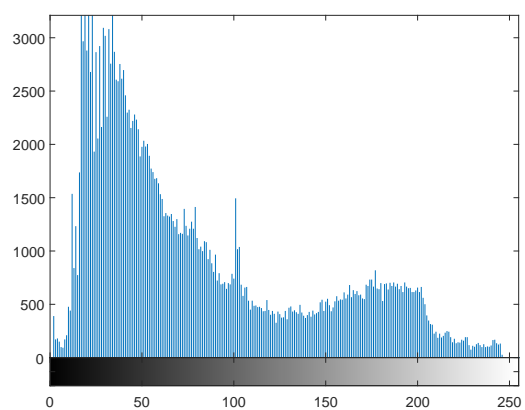


(a) Mapeamento linear.

(b) Mapeamento plateau.



(c) Histograma mapeamento linear.

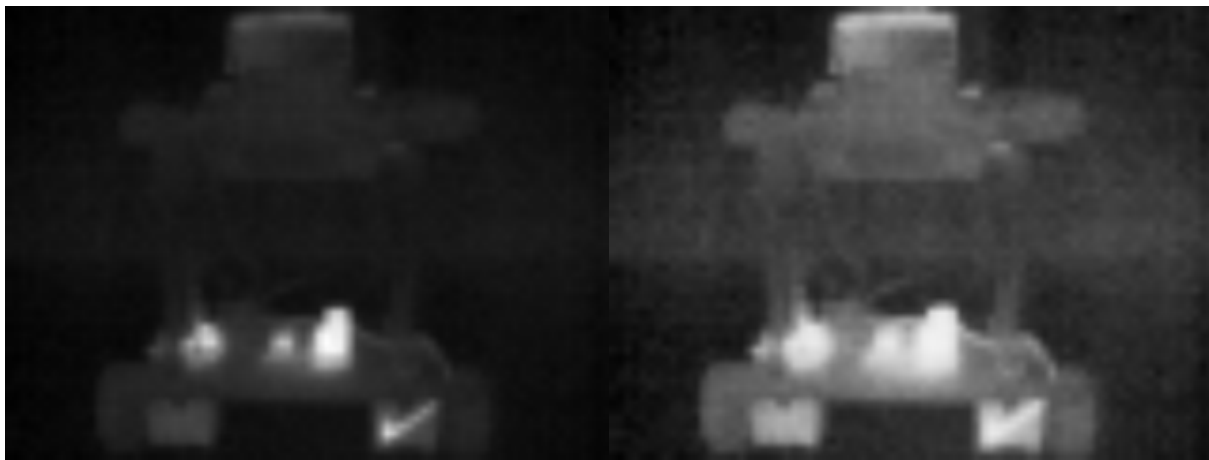


(d) Histograma mapeamento plateau.

Figura 12 – Motor de automóvel.

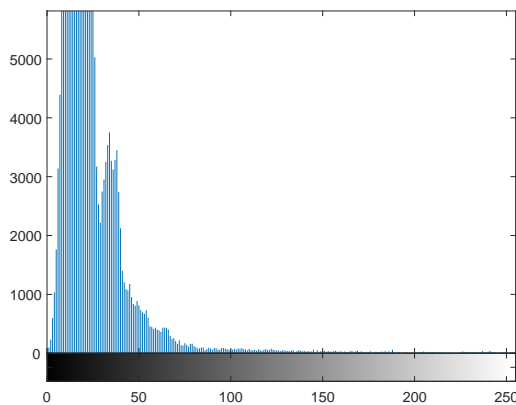
A figura 13 mostra o ensaio relativo ao robô em funcionamento. Quando se compara as imagens (a) e (b) verifica-se que a imagem (a) apresenta pouco contraste e plano de fundo pouco destacado. A imagem (b) visualmente aparenta apresentar mais ruído, entretanto é possível identificar melhor o plano de fundo e a estrutura do robô.

Quando se analisam os histogramas (c) e (d) associados aos métodos de mapeamento linear e plateau ($P=5$), pode-se observar que o método linear utiliza uma faixa muito reduzida e concentrada do histograma. Já o método plateau consegue utilizar melhor a faixa de níveis disponíveis, resultado em melhor contraste. Verifica-se com o cálculo do desvio padrão, onde foi obtido o valor de 24 para (a) e 41 para (b), que houve aumento de contraste da cena observada.

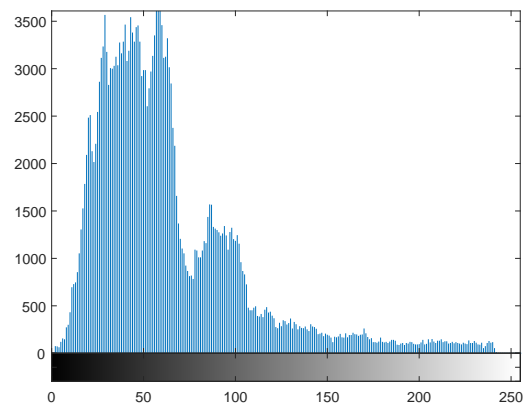


(a) Mapeamento linear.

(b) Mapeamento plateau.



(c) Histograma mapeamento linear.



(d) Histograma mapeamento plateau.

Figura 13 – Robô em funcionamento.

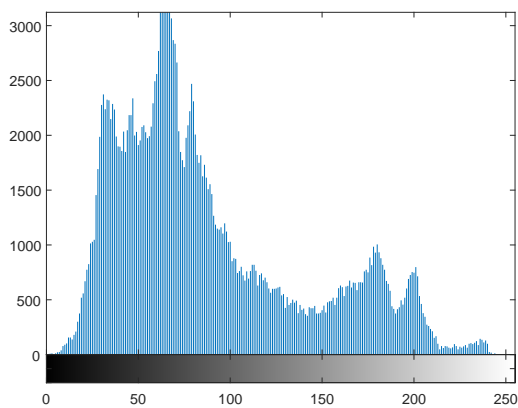
A figura 14 mostra o ensaio relativo ao computador pessoal em funcionamento. Quando se compara as imagens (a) e (b) verifica-se que as duas imagens são bastante semelhantes visualmente. A amostra (b) aparenta possuir maior nível de ruído. Quando são analisados os histogramas (c) e (d) relativos ao método linear e plateau ($P=8$), nota-se que ambos apresentam similaridade.

Isso mostra que neste caso ambos os métodos de mapeamento podem apresentar resultados satisfatórios. Quando se analisa o desvio padrão das imagens os valores encontrados foram 51 para figura (a) e 65 para (b) o que confirma que existe apenas uma pequena diferença de contraste entre as cenas uma vez que os histogramas são bastante dispersos.

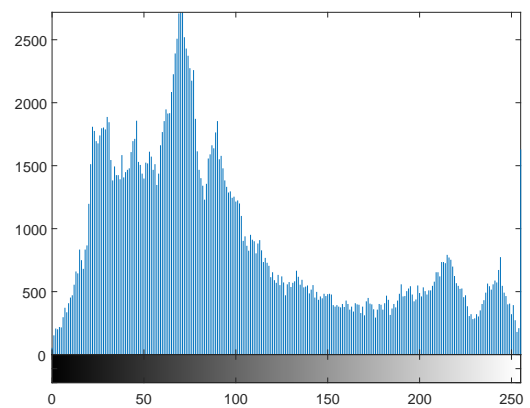


(a) Mapeamento linear.

(b) Mapeamento plateau.



(c) Histograma mapeamento linear.

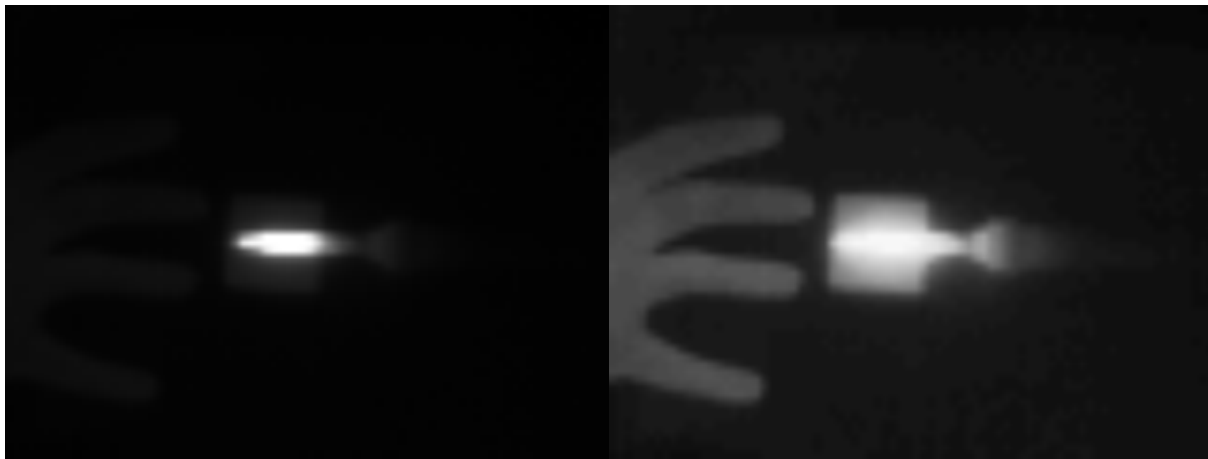


(d) Histograma mapeamento plateau.

Figura 14 – Computador pessoal.

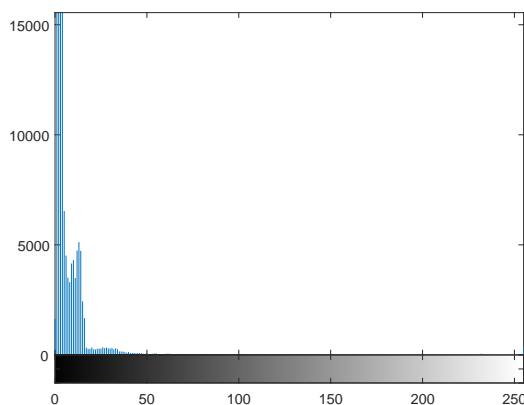
A figura 15 mostra o ensaio relativo ao ferro de solda em funcionamento. Quando se compara as imagens (a) e (b) é constatado que a imagem (a) tem contraste bastante reduzido. Já para a amostra (b) é possível observar os elementos presentes cena de forma mais nítida. Quando são analisados os histogramas (c) e (d) relativos ao método linear e plateau ($P=4$), é constatado que o histograma (c) apresenta uma quantidade de valores bastante concentrados em uma pequena faixa. Já o histograma (d) apresenta uma dispersão maior em relação ao histograma (c) com uma quantidade maior de níveis de sinal ocupado na faixa disponível.

Quando analisamos o desvio padrão verificamos que para a figura (a) encontramos o valor de 20 e para (b) 35. Neste caso os histogramas não apresentam uma grande faixa de ocupação de níveis de sinal, mas a medida desvio padrão comprova que houve aumento de contraste na cena. Este fato pode ser observado quando se compara as respectivas imagens térmicas.

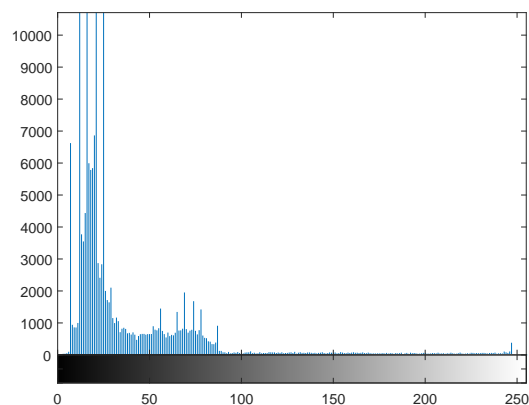


(a) Mapeamento linear.

(b) Mapeamento plateau.



(c) Histograma mapeamento linear.



(d) Histograma mapeamento plateau.

Figura 15 – Ferro de solda.

Conclusão

Os resultados obtidos experimentalmente mostram que o sistema construído proporcionou explorar, observar e analisar de fenômenos térmicos onde com as funcionalidades implementadas foi possível a obtenção de bons resultados dentro das limitações impostas pelo hardware.

Foram implementados diversos algoritmos tanto para o processamento de imagens quanto para o correto funcionamento do sistema que representaram um grande desafio, pois o processo de integração dos mesmos e a necessidade do uso de otimizações torna o processo de depuração do código mais complexo.

Obteve-se um sistema estável onde todas as funcionalidades funcionaram de acordo com o que foi proposto, no entanto em relação a performance houve variações na taxa de quadros que o sistema pode processar quando se utiliza diferentes algoritmos para mapeamento, mas a queda na taxa de quadros não impacta na funcionalidade ou desempenho geral do sistema.

Podemos dizer que obteve-se sucesso na construção e desenvolvimento do equipamento onde os objetivos iniciais foram alcançados mas ainda pode-se implementar melhorias e novas funcionalidades.

6.1 Principais Contribuições

Podemos destacar como contribuições mais relevantes como sendo a implementação do sistema com o uso limitado de recursos limitados damos destaque ao fato que este sistema trabalha com um microcontrolador de alta performance que conseguiu realizar o trabalho de processamento necessário e conseguiu-se atingir um alto nível de integração de software e hardware.

Este tipo de implementação pode ser visto como alternativa a sistemas embarcados baseados em sistemas mais complexos que trabalham com arquiteturas mais avançadas e são em sua maioria baseadas em linux ou windows.

Também pode-se destacar o estudo e implementação de algoritmos específicos para o processamento de imagens térmicas como o método de equalização de histograma Plateau, onde verificamos heurísticamente e também por meio de análises numéricas, que este apresenta de modo geral imagens com maior qualidade.

6.2 Trabalhos Futuros

Este projeto tem grande potencial para melhoria pois foi lançado no mercado (2018) uma nova linha de microcontroladores da mesma família que foi utilizado no projeto, onde este opera em uma frequência de 400Mhz e possui mais memória ram interna, assim poderiam ser implementados outros algoritmos como filtros, funções de mapeamento e outras funcionalidades. Com as funcionalidades atuais poderia-se obter uma taxa de quadros superior em relação a implementação atual.

Também surgiu no mercado câmeras IR do mesmo fabricante com maior resolução e que são compatíveis com o hardware existente e em parte com o software, onde poderia-se obter imagens com mais detalhes.

Referências

- 1 HTTP://TES.ASU.EDU. distribuição de planck. n. 1, p. 1, julho 2018. Disponível em: <http://tes.asu.edu/MARS_SURVEYOR/MGSTES/planck.gif>.
- 2 OPTOTHERM, I. Emissivity in the infrared. n. 1, p. 1–9, junho 2018. Disponível em: <<https://www.optotherm.com/emiss-what.htm>>.
- 3 BERKELEY. Berkeley bolometers. n. 1, p. 1, junho 2018. Disponível em: <<http://bolo.berkeley.edu/bolometers/introduction.html>>.
- 4 STMICROELECTRONICS. *Discovery kit for STM32F7 Series with STM32F746NG MCU*. [S.l.], 2017. Disponível em: <http://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00190424.pdf>.
- 5 FLIR COMMERCIAL SYSTEMS. *FLIR LEPTON® with Radiometry Datasheet REV 110*. EUA, 2016. Disponível em: <<https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/lepton-engineering-datasheet---with-radiometry.pdf>>.
- 6 NASA. The electromagnetic spectrum. *None*, n. 1, p. 1, march 2013. Disponível em: <<https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>>.
- 7 INCROPERA, F. P.; DEWIT, D. P.; LAVINE, A. S. *Fundamentos de Transferência de calor e de Massa 6ª edição*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2008. 460-500 p.
- 8 RUBIN, J. The discovery of the spectrum of light repeat newton's prism experiments and herschel's and ritter's experiments. n. 1, p. 1, February 2018. Disponível em: <<http://www.juliantrubin.com/bigten/lightexperiments.html>>.
- 9 KLUS, H. *The Star Garden*. London, UK: The Star Garden, 2017.
- 10 NASA. Discovering the electromagnetic spectrum. *NONE*, n. 1, p. 1, Setember 2013. Disponível em: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/history_multiwavelength1.html>.
- 11 SARKAR, D. S. . T. Maxwell, hertz, the maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Volume: 45, Issue: 2, n. 1, p. 13 – 19, 2003. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1203114/>>.
- 12 HAMAMATSU. *characteristics and use of infrared detectors*. [S.l.], junho 2018. 3-43 p. Disponível em: <https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/infrared_kird9001e.pdf>.

-
- 13 MOVITHERM. What is netd in a thermal camera? *None*, n. 1, p. 1, junho 2018. Disponível em: <<http://movitherm.com/knowledgebase/netd-thermal-camera/>>.
- 14 VICKERS, V. E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery. *1996 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, n. 1, p. 6, Aug. 30, 1995.
- 15 WITTMAN, T. Mathematical techniques for image interpolation. n. 1, p. 33, February 2018. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.91.8726&rep=rep1&type=pdf>>.
- 16 CHRISTIAN, S. *ANALYSIS OF CONTRAST ENHANCEMENT METHODS FOR INFRARED IMAGES*. Dec, 2011. 99 p. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.668.9453&rep=rep1&type=pdf>>.